FILTRE SIGMA ET SES VARIANTES APPLIQUÉS AUX IMAGES RADAR SAR POLARIMÉTRIQUES

Souhila BOUTARFA *, Lynda BOUCHEMAKH, Youcef SMARA

Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Faculté d'Électronique et d'Informatique, Laboratoire de Traitement d'Images et Rayonnement.
B.P. 32, El Alia, Bab Ezzouar, 16111, Alger, Algérie.
Téléphone : (+ 213 - 21) 247 950, poste 806 ; Télécopieur (FAX) : (+ 213 - 21) 247 187 Courriel : s.boutarfa@hotmail.fr, lbouchemakh@usthb.dz, yousmara@yahoo.com*

Soumis le 07 mars 2011 ; accepté le 15 décembre 2012 - © *Revue Télédétection*, 2012, vol. 11, n° 2, p. 307-323

Résumé

Les images acquises par les systèmes radar SAR polarimétrique (POLSAR) sont caractérisées par la présence d'un bruit nommé bruit de chatoiement ou speckle. Ce dernier, de nature multiplicative, corrompt à la fois l'amplitude des images et la phase, ce qui complique l'interprétation des données, dégrade la performance de segmentation et réduit la détectabilité des cibles. D'où la nécessité de prétraiter les images par des méthodes de filtrage adaptées, avant de procéder à leur analyse.

Dans cet article, nous présentons le filtre Sigma de Lee et ses deux versions améliorées qui se basent sur la connaissance de la densité de probabilité du signal radar. Le filtre Sigma utilise le calcul de la moyenne locale à partir des pixels compris dans un intervalle de valeur égale à deux-Sigma. Le filtre Sigma amélioré repose sur l'estimation de l'erreur quadratique moyenne minimale EQMM (MMSE : Minimum Mean Square Error). Le filtre Sigma amélioré avec détection de forts diffuseurs se base sur la préservation des points fortement réfléchis et l'application de l'EQMM sur les pixels de l'image.

Les méthodes sont appliquées sur trois images polarimétriques (HH, HV, VV) acquises par le capteur ESAR correspondant à la zone d'Oberpfaffenhofen, de Munich en Allemagne, sur des images d'Oran en Algérie en bi-polarisations acquises par le satellite ENVISAT, ainsi que sur des images totalement polarimétriques d'Alger, Algérie, acquises par le satellite RADARSAT-2.

Mots clés : *Images POLSAR, filtrage de chatoiement, polarimétrie, filtre de Lee adaptatif, filtre Sigma de Lee, filtre Sigma amélioré.*

Abstract

The images acquired by a Polarimetric Synthetic Aperture Radar (POLSAR) are characterized by an inherent multiplicative noise called speckle. It corrupts both the amplitude and the phase, which complicates data interpretation, degrades segmentation performance and reduces target detectability. Hence, we need to preprocess the images by adaptive filtering methods before their analysis.

*In this paper, we present the Lee Sigma filter and its two enhanced versions that are based on knowledge of the radar probability density**.** The Sigma filter uses the calculation of the local mean from the pixels included in a two-Sigma interval. The improved Sigma filter is based on the estimation of the Minimum Mean Square Error MMSE. The improved Sigma filter with strong scatterer detection is based on the point targets preservation and application of the MMSE on the pixels of image.*

The methods are applied on three polarimetric images (HH, HV, VV) acquired by the ESAR sensor corresponding to the area located in Oberpfaffenhofen, in Munich, Germany, and on the bi - polarization images acquired by the ENVISAT satellite corresponding to the region of Oran in Algeria, and on the fully polarimetric images acquired by the RADARSAT-2 satellite on the area of Algiers, Algeria.

Keywords: *POLSAR images, speckle filtering, polarimetry, adaptive Lee filter, Lee Sigma filter, improved Sigma filter.*

1. INTRODUCTION

Un Radar à Synthèse d'Ouverture RSO (ou SAR : Synthetic Aperture Radar) produit des images avec un bruit de chatoiement, ou speckle, important. Les images radar SAR polarimétriques (POLSAR) suscitent un intérêt marqué auprès des chercheurs dans plusieurs domaines, tels que les domaines de la géologie, la glaciologie et l'hydrologie.

Cependant, la présence du speckle rend l'interprétation et l'extraction de l'information difficile. Il dégrade ainsi la performance de segmentation et réduit la détectabilité des cibles. La disponibilité des données POLSAR a permis de traiter des données radar polarimétriques en intensité, en amplitude et en complexe afin de réduire le speckle dans l'image et d'appliquer les techniques d'extraction d'informations.

Notre étude a pour objet de traiter des images polarimétriques mono-vues par le filtre Sigma et ses versions améliorées proposés par Lee (Lee and *al.*, 2008) (Lee and *al.*, 2009) : Sigma, Sigma amélioré et Sigma amélioré avec détection de forts diffuseurs. Ce sont des filtres adaptatifs qui se basent sur les statistiques locales pour déterminer le degré d'homogénéité des régions.

L'évaluation statistique s'est faite en calculant les paramètres classiques utilisés pour ce type de traitement, tels que la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation, ainsi que d'autres paramètres nécessaires à l'évaluation des images POLSAR en vue de vérifier nos critères : le lissage des zones homogènes et la préservation des caractéristiques structurelles des objets de la scène. Le critère de préservation de l'information polarimétrique est vérifié par le tracé des signatures polarimétriques : critère très important dans le filtrage polarimétrique. Afin de valider nos divers résultats nous avons effectué une étude comparative de classification non supervisée sur les images polarimétriques avant et après filtrage.

Les méthodes sont implémentées sur les éléments de la matrice de covariance polarimétrique, le *Span* et les canaux complexes. Elles sont appliquées sur des images POLSAR de la zone d'Oberpfaffenhofen située dans la région de Munich (Allemagne) et sur des images d'Oran et d'Alger (Algérie).

2. ETAT DE L'ART SUR LE FILTRAGE DE SPECKLE

Au cours de ces deux dernières décennies, les chercheurs ont développé de nombreux algorithmes de filtrage d'images POLSAR pour réduire le speckle afin de faciliter leur interprétation. Parmi ces méthodes nous citons : le filtre de Russel basé sur la représentation en 3D des distributions des pixels dans les images polarimétriques (Russel and Gonzelo, 1991), des versions améliorées à seuils adaptatifs 1 et 2 (SA1 et SA2) (Saad et El Assad, 1996), qui rendent le filtre de Russell adaptatif grâce à l'analyse des caractéristiques locales du vecteur traitéle, le filtre de Lee adaptatif basé sur la détection de contours et le calcul des paramètres de filtrage (Lee and *al.*,1999) (Lee and *al.*, 2006), le filtre de Lee dans le cas de double polarisation des images ASAR du satellite ENVISAT (Ferro - Famil, 2007) (Boutarfa et al, 2009), le filtrage par la technique de croissance de région basé sur la recherche des pixels ayant les mêmes propriétés statistiques (Vasile *et al.*, 2006), le filtrage par le modèle de diffusion basé sur la sélection des pixels voisins (Lee and *al.*, 2006), le filtre PWF (Polarimetric Whitenig Filter) de Novak qui utilise de façon optimale les éléments de la matrice de covariance polarimétrique pour construire une image intensité avec un minimum de speckle (Novak and Burl, 1990) (Bouchemakh and *al.*, 2008) et le filtre PWF amélioré appelé ESDPWF (Enhanced Structure Detection PWF) obtenu en combinant la méthode mise en valeur de détection de structure avec l'algorithme PWF (Nan and *al.*, 2007) (Boutarfa *et al.*, 2009). Nous citons aussi le filtre optimal de pondération qui exploite les corrélations statistiques entre les canaux afin de produire une seule image filtrée (Lee and *al.*, 1992) (Lee and Pottier, 2009) et le filtrage par la transformée en ondelettes stationnaire basé sur la détection de bords multi-échelles pour l'amélioration des coefficients d'ondelettes (Farage and *al.*, 2007).

3. MODELE MULTIPLICATIF DU BRUIT SPECKLE

Connaitre les statistiques du speckle est indispensable pour améliorer l'extraction des informations par la conception d'algorithmes de filtrage, de l'estimation des paramètres géophysiques, de la classification, etc.

Pour les données SAR complètement polarimétriques, leurs caractéristiques statistiques ne sont pas limitées qu'aux intensités ou aux amplitudes. Le bruit speckle n'apparaît pas seulement dans les trois images intensités de la matrice de covariance, mais également dans les termes de produits complexes entre les polarisations.

Le modèle du speckle dans les images radar polarimétriques est un modèle multiplicatif (Lee, 1980) (Lee, 1981) représenté par :

$$y = v \times x$$

$$\text{avec } (\sigma_v)^2 = \frac{1}{N} \quad \text{et} \quad Cv_v = \frac{\sigma_v}{\mu_v} \qquad (1)$$

Où y est le pixel original du signal observé, x est le pixel filtré qui correspond à l'information que l'on veut mesurer et v est le processus aléatoire correspondant au bruit speckle, qui est multiplié au signal avec une moyenne $\mu_v = 1$,

N est le nombre de vues, $(\sigma_v)^2$ est la variance du speckle et Cv_v est le coefficient de variation du speckle. L'objectif du filtrage consiste à estimer le pixel *x* de l'image connaissant le pixel observé *y*.

Le filtrage polarimétrique réduit le speckle des éléments de la matrice de covariance ou de la matrice de cohérence (Lee and Pottier, 2009). Les termes diagonaux de la matrice de covariance représentent l'intensité de la polarisation linéaire et peuvent être caractérisés par un bruit multiplicatif. Les termes hors-diagonaux contiennent un bruit qui ne peut être caractérisé ni par un modèle multiplicatif ni additif (Lee and *al.*, 1999).

Dans notre travail, nous avons testé les caractéristiques statistiques des termes diagonaux et hors diagonaux en traçant les nuages de points de l'écart-type en fonction de la moyenne calculés dans une fenêtre d'étude de taille 5 × 5 des images ESAR de la région de Munich (Allemagne). Dans la figure 1, les intensités $|HH|^2$, $|HV|^2$ et $|VV|^2$ montrent les caractéristiques d'un bruit multiplicatif. Les parties réelles et imaginaires de $HH\,.\,VV^*$ (l'exposant * fait référence au conjugué complexe) sont plus difficiles à caractériser, elles montrent les caractéristiques d'un bruit qui n'est pas multiplicatif.

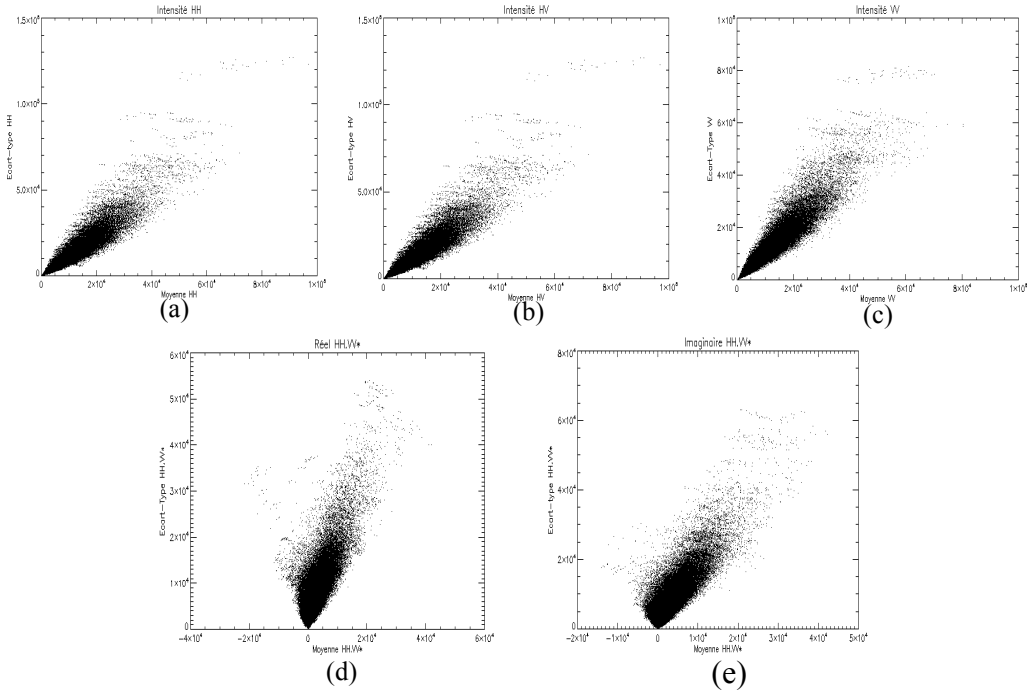


Figure 1: Tracé de la distribution de l'écart-type en fonction de la moyenne. (a) $|HH|^2$, (b) $|HV|^2$, (c) $|VV|^2$, (d) Partie réelle de *(VV.HH*)*, (e) Partie imaginaire de *(VV.HH*)*.

Figure 1: *Scatter plots of standard deviation versus mean*. (a) $|HH|^2$, (b) $|HV|^2$, (c) $|VV|^2$, (d) *Real part of (VV.HH*)*, (e) Imaginary *part of (VV.HH*)*.

4. FILTRE SIGMA DE LEE

Le filtre Sigma proposé par Lee (Lee, 1983) a été conçu pour filtrer des images SAR. Lee a défini un intervalle de probabilité de deux-sigmas, de sorte que 95.5 % des pixels de l'image soient distribués dans cet intervalle, autour de la moyenne. Lors du filtrage, les statistiques locales (en l'occurrence la moyenne), sont estimées à partir des pixels compris dans cet intervalle.

Cette méthode s'applique aussi sur les images POLSAR (Boutarfa *et al.*, 2010) en traitant les éléments de la matrice de covariance (Lee and *al.*, 1999), de la façon suivante :

A partir de l'image *Span* (équation 2), on calcule l'intervalle de sigma [I_1, I_2], tel que :

$$Span = |HH|^2 + |HV|^2 + |VH|^2 + |VV|^2 \quad (2)$$

$$I_1 = \tilde{x} + 2\sigma_v \tilde{x} \quad (3)$$

et $I_2 = \tilde{x} - 2\sigma_v \tilde{x}$ (4)

avec $\sigma_v = \frac{1}{\sqrt{N}}$ (pour une image en intensité) (5)

Où :

$\tilde{x}$ est la valeur du pixel central de la fenêtre mobile de taille f × f pixels (3 × 3, 5 × 5 ou 7 × 7, …).

σ_v est l'écart type du bruit multiplicatif.

N est le nombre de vues des données POLSAR.

A partir de l'image *Span*, on sélectionne les pixels de la fenêtre qui appartiennent à l'intervalle, (en tout, 95.5 % des pixels de la fenêtre de l'image seront sélectionnés).

On calcule la moyenne des pixels sélectionnés. Cette moyenne représente la valeur du pixel filtré qui va remplacer le pixel central de la fenêtre d'étude.

Le filtre Sigma de Lee a été mis en œuvre dans plusieurs logiciels, en raison de sa simplicité et de son efficacité dans la réduction du speckle dans les zones homogènes. Cependant, les inconvénients de ce filtre sont (Lee and *al.*, 2009) :

Il ne maintient pas la valeur de la moyenne de l'image constante avant et après filtrage. La figure 2 illustre ce problème.

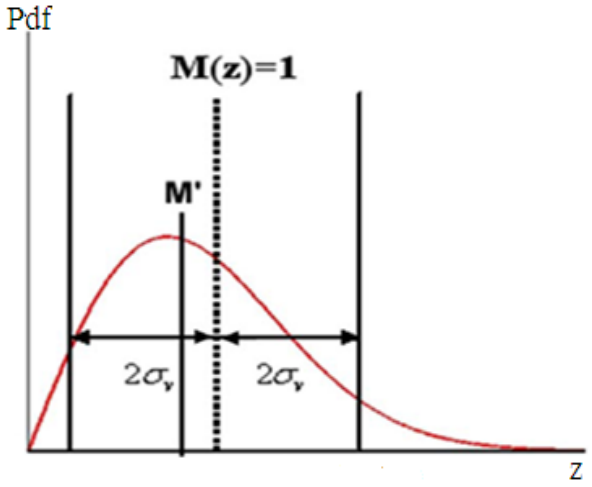


Figure 2 : Déplacement de la moyenne de M à M' (Lee and *al.*, 2009) .
Figure 2: Mean moving from M to M '(Lee and al., 2009).

- Les forts diffuseurs sont flous et parfois même supprimés car l'algorithme Sigma filtre tous les pixels de la même manière.

- Les zones sombres ne sont pas filtrées car les pixels dont l'intensité est très faible vont engendrer des intervalles très étroits et dans des cas extrêmes l'intervalle sera nul (pixels noirs). Donc, le pixel central de la fenêtre mobile ne sera pas filtré.

5. FILTRE SIGMA AMÉLIORÉ.

Le filtre sigma amélioré (Lee and *al.*, 2008) (Lee and *al.*, 2009) (Boutarfa *et al.*, 2010) a été conçu afin de combler les insuffisances du filtre précédent. Le problème de déplacement de la moyenne a été résolu en redéfinissant la gamme de Sigma basée sur les fonctions de densité de probabilité du speckle, ce qui veut dire que 90% des pixels seront sélectionnés. Un estimateur de l'erreur quadratique moyenne minimale MMSE est pris en compte pour la réduction adaptative du speckle.

Afin de maintenir la valeur moyenne dans les images POLSAR, le filtre Sigma amélioré se base sur la densité de probabilité du speckle pour le calcul de l'intervalle de confiance à partir de la valeur Sigma, notée ξ, donnée par:

$$\xi = \int_{I_1}^{I_2} P_N(I)\,dI$$

Où :
$P_N(I)$ représente la fonction de densité de probabilité du speckle (en intensité).

Les nouvelles gammes [I_1, I_2] de Sigma (90 %) pour des données en intensité allant d'une vue jusqu'à quatre vues sont montrées dans le tableau 1.

Nombre de vues	I_1	I_2
1	0,084	3,941
2	0,221	2,722
3	0,313	2,320
4	0,378	2,094

Tableau 1 : La nouvelle gamme de 90 % de Sigma.
Table 1: The new 90 % Sigma range.

Nous notons qu'en raison des fonctions de densité, l'intervalle [I_1, I_2] n'est pas symétrique par rapport à la moyenne $\bar{I} = 1$, car (1 - I_1) est toujours inferieur à (I_2 - 1). Il est préférable de prendre ξ entre 0.80 et 0.90, car pour ces deux valeurs, cet écart est réduit. Dans Lee and al, 2009, Lee a choisi de prendre ξ = 0.90, c'est-à-dire que 90% des pixels seront sélectionnés. La nouvelle gamme de Sigma est : $[I_1\tilde{x}, I_2\tilde{x}]$.

Dans ce nouveau intervalle, la valeur moyenne *à priori* peut être calculée facilement à partir du tableau 1. Dans le filtre Sigma original $\tilde{x}$ est égal à la valeur du pixel central de la fenêtre mobile, ce qui produit le problème des pixels sombres isolés. Le filtre Sigma amélioré applique le filtre MMSE dans une fenêtre 3 × 3 pour estimer la valeur moyenne *à priori*. Cela va permettre de minimiser les pixels sombres isolés et améliorer l'effet de filtrage.

Le filtre MMSE estime la moyenne à *priori* $\tilde{x}$ par le calcul de la variance des pixels et le paramètre *b*, tel que :

$$\tilde{x} = \bar{y} + b\,(y - \bar{y}) \quad (7)$$

avec $$b = \frac{\text{var } (x)}{\text{var } (y)} \quad (8)$$

et $$\text{var}(x) = \frac{\text{var}(y) - \bar{y}^2\sigma_v^2}{1 + \sigma_v^2} \quad (9)$$

Où :

b est le coefficient de filtrage adaptatif ayant une valeur comprise entre 0 et 1,

σ_v est l'écart type du speckle, pour des données POLSAR d'une vue, σ_v est égal à 1, et pour des données de *N* vues, σ_v est égale à $1/\sqrt{N}$.

$\bar{y}$ et *var(y)* représentent respectivement la moyenne et la variance des pixels dans l'intervalle Sigma de l'image *Span* (équation 2).

Dans une fenêtre mobile de 9×9, 11×11 ou plus, les pixels qui appartiennent au nouvel intervalle Sigma sont inclus dans la procédure de préservation de bords et des détails fins, ensuite le filtre MMSE sera appliqué de nouveau aux pixels sélectionnés.

Cependant, lorsqu'on applique le filtre MMSE dans le filtrage final, Lee a constaté que l'écart-type du speckle doit être ajusté (Lee and *al.*, 2009), car les pixels sélectionnés par la méthode MMSE forment une image sur-filtrée. Cela est dû

au fait que l'intervalle de la densité de probabilité qui était précédemment de $[0, \infty[$ est réduit à $[I_1\tilde{x},\ I_2\tilde{x}]$. Par conséquent, la valeur de l'écart-type doit être ajustée. Cela s'obtient par l'équation suivante :

$$\tilde{\sigma}_v = \frac{1}{\xi}\int_{I_1}^{I_2}(I-1)^2\ P_N(I)\ dI \qquad (10)$$

Les valeurs de l'écart-type du speckle σ_v et de l'écart-type ajusté $\tilde{\sigma}_v$ des données en intensité allant d'une vue jusqu'à quatre vues sont montrées dans le tableau 2.

Nombre de vues	σ_v	$\tilde{\sigma}_v$
1	1,000	0,819
2	0,707	0,569
3	0,577	0,462
4	0,500	0,399

Tableau 2 : Les valeurs de l'écart-type du speckle σ_v et de l'écart-type ajusté $\tilde{\sigma}_v$.
Table 2: Speckle standard deviation σ_v and adjusted standard deviation $\tilde{\sigma}_v$ values.

Le filtre Sigma amélioré de Lee permet d'obtenir un meilleur lissage que le précédent. Cependant, le problème de suppression des points fortement réfléchis persiste toujours. Lee a remédié à ce problème par un algorithme de détection de forts diffuseurs auquel nous allons nous intéresser.

6. FILTRE SIGMA AMÉLIORÉ AVEC DÉTECTION DE FORTS DIFFUSEURS

Lee a élaboré un filtre Sigma amélioré avec détection de forts diffuseurs (Lee and *al.*, 2008) (Lee and *al.*, 2009) (Boutarfa *et al.*, 2010) afin de préserver la signature polarimétrique et de conserver les structures qui sont nécessaires à l'interprétation de l'image.

Pour les données SAR polarimétriques, le filtrage se base sur la matrice de cohérence *T* (Lee and Pottier, 2009). Les forts diffuseurs sont détectés par l'image T_{11} (équation 11) pour les réflexions spéculaires et l'image T_{22} (équation 11) pour les doubles rebonds. Le terme T_{33} (équation 13) n'est pas utilisé pour la détection des forts diffuseurs, car ces derniers ont de faibles réflexions en polarisation croisée.

$$T_{11} = |HH + VV|^2 \qquad (11)$$

$$T_{22} = |HH - VV|^2 \qquad (12)$$

$$T_{33} = 2|HV|^2 \qquad (13)$$

Dans une fenêtre mobile f × f (5 × 5, 7 × 7 ou plus), on utilise une fenêtre de taille 3 × 3 pixels (centre de la fenêtre f × f) pour la détection de forts diffuseurs (Lee *et al.*, 2008). Les étapes de cet algorithme sont définies comme suit (Lee *et al*., 2009) :

On calcule Z_{98} qui représente 98 % de tous les pixels des données POLSAR qui doivent être filtrés.

Dans les images T_{11}et T_{22}, si le pixel central de la fenêtre 3 × 3 (centre de la fenêtre mobile 5 × 5) est supérieur ou égal à Z_{98}, alors, on calcule le nombre des pixels *K* qui sont supérieurs ou égal à Z_{98} dans cette fenêtre 3 × 3.

Si *K* est supérieur ou égal au seuil T_k (Lee propose de prendre T_k entre 5 et 7), alors, le pixel de l'image reçoit le pixel central de la fenêtre 3 × 3. Tous les pixels de cette fenêtre qui sont supérieurs ou égale à Z_{98} ne seront pas filtrés.

Sinon, on applique le filtre Sigma amélioré aux pixels de la fenêtre mobile 5×5.

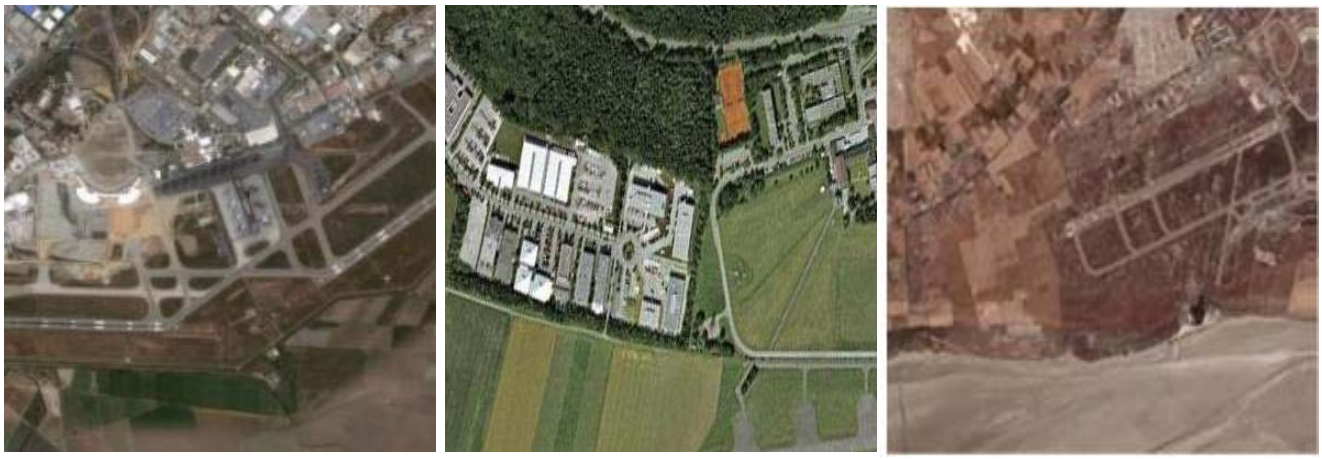
Si le pixel central de la fenêtre 3×3 est inferieur à Z_{98}, on applique le filtre Sigma amélioré.

Afin de valider les méthodes étudiées, nous avons effectué dans la section suivante une évaluation visuelle et statistique, ainsi qu'une étude comparative des résultats obtenus. L'évaluation est faite visuellement par l'affichage des images *Span* originales et filtrées. L'évaluation statistique est réalisée par le calcul des paramètres statistiques, tels que le coefficient de variation et l'ENL (Equivalent Number of Looks). La préservation de l'information polarimétrique est vérifiée par le tracé de la signature polarimétrique des images avant et après filtrage. Pour montrer l'efficacité des filtres implémentés dans la réduction du speckle et la préservation des contours, nous avons appliqué une classification non supervisée sur les images originales et filtrées.

7. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les tests des filtres sont effectués sur trois images POLSAR complexes mono-vue, la première est aéroportée de taille (2300 × 925) pixels correspondant à la région d'Oberpfaffenhofen située à Munich en Allemagne acquise par le capteur ESAR en 2001, en bande P. La deuxième est de dimension (6239 × 3644) pixels correspondant à la zone d'Alger en Algérie, acquise par le satellite RADARSAT-2 en avril 2009, en bande C. La troisième est de dimension (710 × 675) pixels correspondant à la zone d'Oran (Algérie), en configuration PP3 (HH - VV), acquise par le satellite ENVISAT en 2003, en bande C.

Pour mieux caractériser les cibles et effectuer une comparaison précise, nous avons affiché les images optiques acquises sur les mêmes scènes par un capteur à résolution métrique du satellite IKONOS obtenuesà partir du logiciel Google Earth (figure 3).



(a) (b) (c)

Figure 3 : Images optiques (Google Earth). (a) Munich, (b) Alger, (c) Oran.
Figure 3: Optical images (Google Earth). (A) Munich, (b) Algiers, (c) Oran.

L'évaluation de chaque filtre implémenté repose sur les critères principaux suivants : Capacité à lisser les zones homogènes, aptitude à préserver les contours et surtout préserver l'information polarimétrique.

7.1 Evaluation visuelle

Pour mieux visualiser et comparer les résultats obtenus, nous avons affiché des images de taille (300 × 300). D'après les figures 4, 5 et 6 correspondant aux régions d'Alger, de Munich et d'Oran respectivement, le filtre Sigma amélioré avec détection de forts diffuseurs offre de meilleurs résultats que les deux autres filtres. Il permet d'obtenir un bon lissage des zones homogènes, de préserver les structures linéaires et de conserver les forts diffuseurs.

Les résultats visuels sont insuffisants pour évaluer la performance des filtres. Dans une seconde étape, on se propose de les évaluer statistiquement.

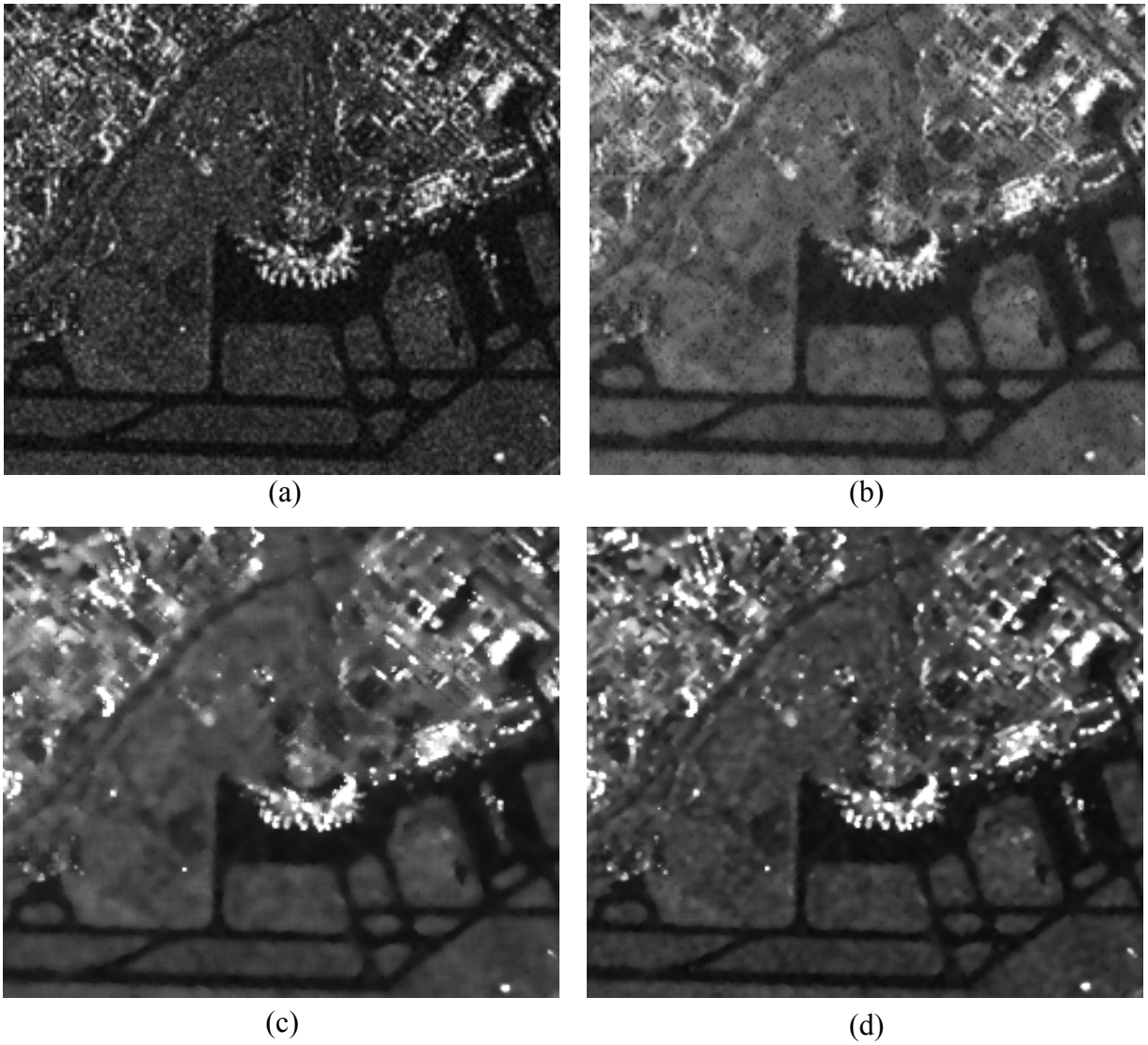


Figure 4 : Images *Span* d'Alger. (a) Originale, (b) Filtrée par le filtre Sigma, (b) Filtrée par le filtre Sigma amélioré, (d) Filtrée par le filtre Sigma améliorée avec détection de forts diffuseurs.
Figure 4 : *Span* image*s* of Algiers. (a) Original, (b) Filtered by the Sigma filter, (b) Filtered by the improved Sigma filter, (d) Filtered by the Sigma improved filter with strong scatterers detection.

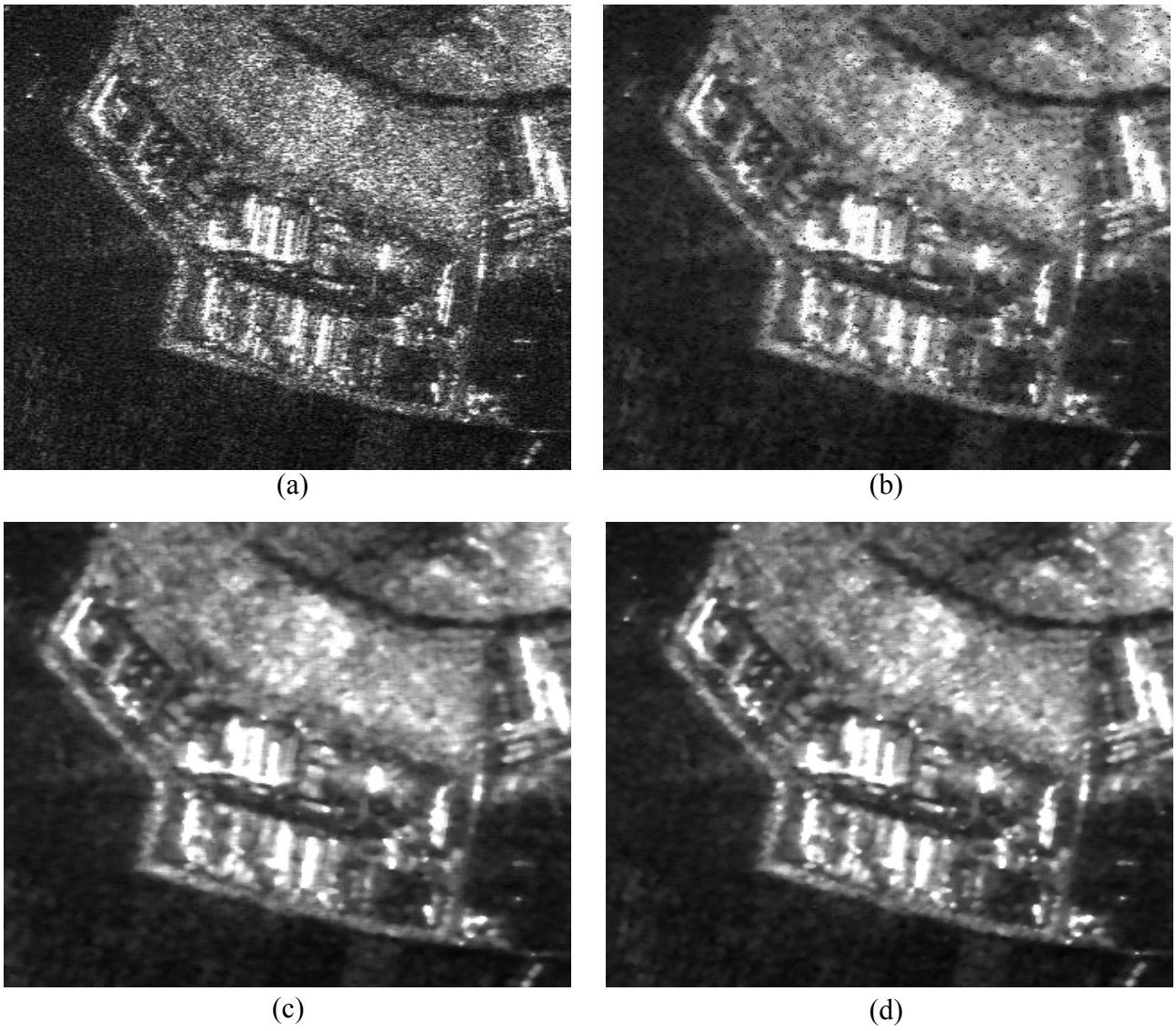


Figure 5 : Images *Span* de Munich. (a) Originale, (b) Filtrée par le filtre Sigma, (b) Filtrée par le filtre Sigma amélioré, (d) Filtrée par le filtre Sigma améliorée avec détection de forts diffuseurs.
Figure 5 : *Span* images of Munich. (a) Original, (b) Filtered by the Sigma filter, (b) Filtered by the improved Sigma filter, (d) Filtered by the Sigma improved filter with strong scatterers detection.

7.2 Evaluation statistique

Pour évaluer la performance de chaque filtre, du point de vue lissage des zones homogènes, nous effectuons des calculs statistiques, sur trois zones homogènes de taille (20 × 20) pixels extraites à partir de l'image.

On donne :

Nombre équivalent de vues : $$ENL = \left(\frac{1}{Cv} \right)^2 \quad (14)$$

Coefficient de variation : $$Cv = \frac{\sigma}{\mu} \quad (15)$$

Moyenne : $$\mu = \frac{\sum_{i=0}^{N_w-1} \sum_{j=0}^{N_w-1} y(i,j)}{N_w \times N_w} \quad (16)$$

Ecart-type : $$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N_w-1}\sum_{j=0}^{N_w-1}(y(i,j)-\mu)^2}{N_w \times N_w}} \quad (17)$$

Où :

y est le pixel original.

x est le pixel filtré.

$N_w \times N_w$ est la dimension de la fenêtre mobile w.

Un bon filtrage dans les zones homogènes est assuré par une augmentation de la valeur de l'*ENL*.

Les résultats statistiques du point de vue lissage des zones homogènes sont illustrés dans les tableaux 3, 4 et 5 pour les différentes régions d'Alger, de Munich et d'Oran.

Tableau 3 : Evaluation du filtre Sigma par l'ENL.
Table 3 : Sigma filter evaluation by the ENL.

Evaluation Sigma				
Zones (*Span*)		**Z1**	**Z2**	**Z3**
ENL (Alger)	**Avant filtrage**	2,170	2,265	2,203
	Après filtrage	**6,481**	**6,512**	**6,440**
ENL (Munich)	**Avant filtrage**	0,863	1,098	0,419
	Après filtrage	**1,832**	**2,651**	**0,856**
ENL (Oran)	**Avant filtrage**	1,726	1,964	1,521
	Après filtrage	**6,108**	**4,903**	**4,252**

Tableau 4 : Evaluation du filtre Sigma amélioré par l'ENL
Table 4 : Improved Sigma filter evaluation by the ENL.

Evaluation Sigma amélioré				
Zones (*Span*)		***Z1***	***Z2***	***Z3***
ENL (Alger)	**Avant filtrage**	2,170	2,265	2,203
	Après filtrage	**10,333**	**11,180**	**9,535**
ENL (Munich)	**Avant filtrage**	0,863	1,098	0,419
	Après filtrage	**2,480**	**3,478**	**1,010**
ENL (Oran)	**Avant filtrage**	1,726	1,964	1,521
	Après filtrage	**14,545**	**10,131**	**7,812**

Tableau 5: Evaluation par l'ENL du filtre sigma amélioré avec détection de forts diffuseurs.
Table 5: Evaluation by the ENL of the Sigma improved filter with strong scatterers detection.

Evaluation Sigma amélioré avec détection de forts diffuseurs				
Zones (*Span*)		***Z1***	***Z2***	***Z3***
ENL (Alger)	**Avant filtrage**	2,170	2,265	2,203
	Après filtrage	**21,879**	**22,117**	**18,965**
ENL (Munich)	**Avant filtrage**	0,863	1,098	0,419
	Après filtrage	**3,252**	**11,832**	**7,550**
ENL (Oran)	**Avant filtrage**	1,726	1,964	1,521
	Après filtrage	**19,240**	**17,543**	**11,387**

D'après les tableaux 3, 4 et 5, nous remarquons que les valeurs de l'*ENL* augmentent après filtrage pour les trois méthodes. Le filtre Sigma amélioré avec détection de forts diffuseurs offre des valeurs de l'*ENL* supérieures à celles des autres filtres. Cela signifie qu'il y a eu un bon lissage des zones homogènes.

Du point de vue préservation de contours, pour les différents filtres étudiés, l'évaluation se fait sur quelques zones hétérogènes de taille (10 × 10) pixels, en calculant sur chacune d'elles le coefficient de variation donné dans l'équation 15.

Le coefficient de variation global de l'image à partir de mesures faites sur Q zones est donné par :

$$Cvg = \frac{1}{Q}\sum_{i=1}^{Q} Cv_i \qquad (18)$$

Où :

Cv_i est le coefficient de variation de la zone i.

Le meilleur filtre du point de vue préservation de contours est celui qui donne le plus grand coefficient de variation *Cvg*.

Les valeurs de *Cvg* calculées pour chaque filtre sont données dans le tableau 6.

Tableau 6: Evaluation des filtres par le coefficient de variation global *Cvg*.
Table 6: Filters evaluation by the global coefficient of variation *Cvg*.

Cvg	**Sigma**	**Sigma amélioré**	**Sigma amélioré avec détection de contours**
Alger	0,910	4,982	**6,310**
Munich	0,669	0,733	**0,751**
Oran	0,349	0,382	**0,414**

Dans le tableau 6, nous remarquons que le meilleur résultat du point de vue préservation de contours est donné par le filtre Sigma amélioré avec détection de contours.

Le filtre qui a donné une plus grande augmentation de l'*ENL* et une plus grande valeur du coefficient de variation globale *Cvg* est le filtre Sigma amélioré avec détection de forts diffuseurs. Nous concluons donc que c'est le filtre qui a donné les meilleurs résultats statistiques pour le lissage des zones homogènes et la préservation des contours.

7.3 Evaluation par la signature polarimétrique

Dans cette partie, nous avons implémenté un algorithme de génération de signatures polarimétriques que nous avons testé sur certaines cibles dans les images originales et filtrées.

La signature polarimétrique permet de caractériser les cibles d'après leurs propriétés de diffusion (Ulaby and Elachi, 1990) **(**Ouarzeddine and *al.*, 2006). L'évaluation par son tracé a pour but de vérifier si ces propriétés de diffusion ne sont pas modifiées par le filtrage (Centre canadien de télédétection, 2009). Pour cela, nous avons comparé les signatures polarimétriques des images filtrées dans les zones homogènes aux images non filtrées.

Les signatures polarimétriques de la cible, avant et après filtrage par les trois méthodes sont représentées dans la figure 6.

D'après la figure 6, on constate que les signatures polarimétriques (co-polarisée et polarisation croisée) ont été bien préservées après filtrage par la méthode Sigma amélioré et la méthode Sigma amélioré avec détection de forts diffuseurs.

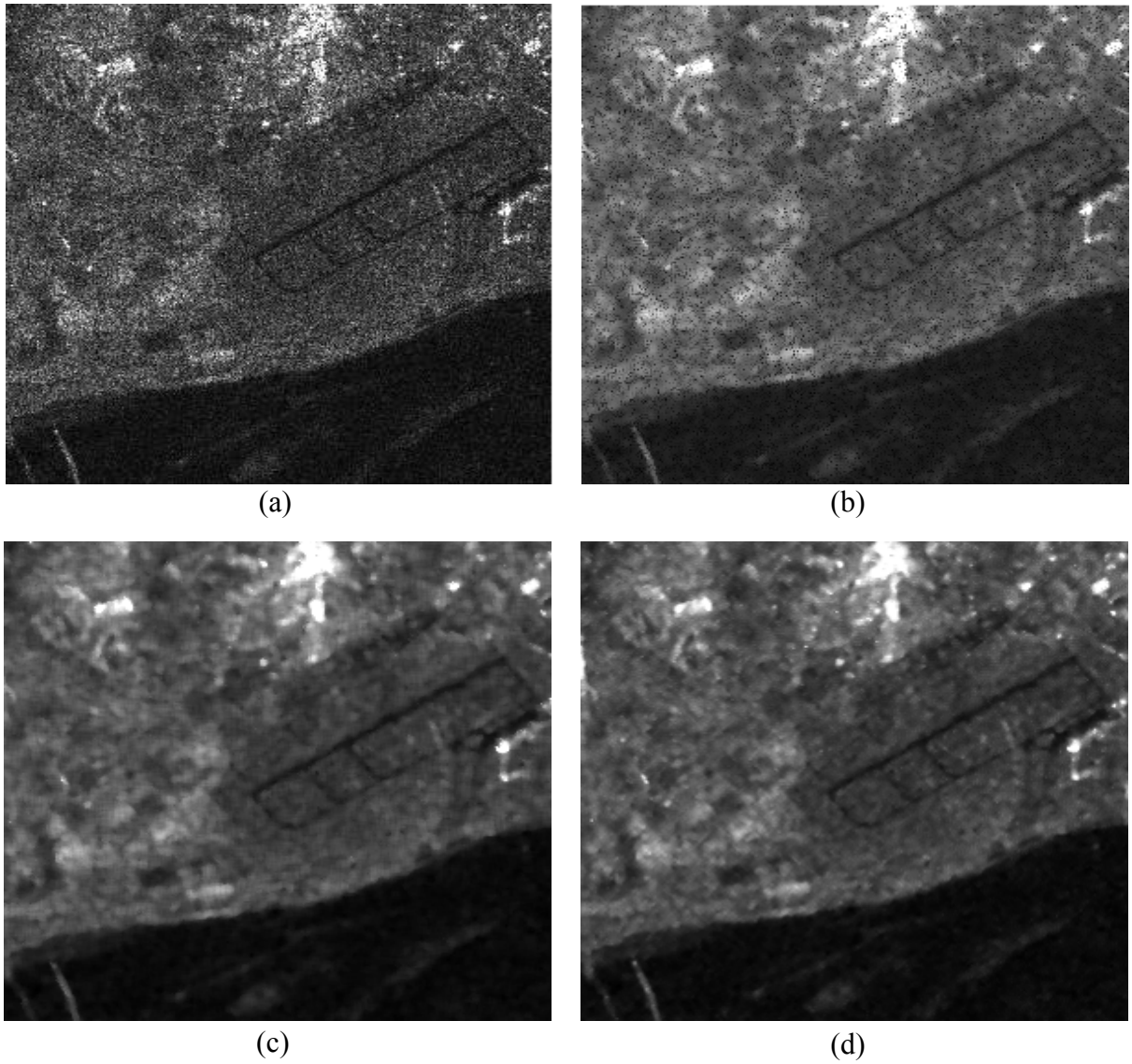


Figure 6 : Images *Span* d'Oran. (a) Originale, (b) Filtrée par le filtre Sigma, (c) Filtrée par le filtre Sigma amélioré, (d) Filtrée par le filtre Sigma améliorée avec détection de forts diffuseurs.
Figure 6 : *Span* image*s* of Oran. (a) Original, (b) Filtered by the Sigma filter, (b) Filtered by the improved Sigma filter, (d) Filtered by the Sigma improved filter with strong scatterers detection.

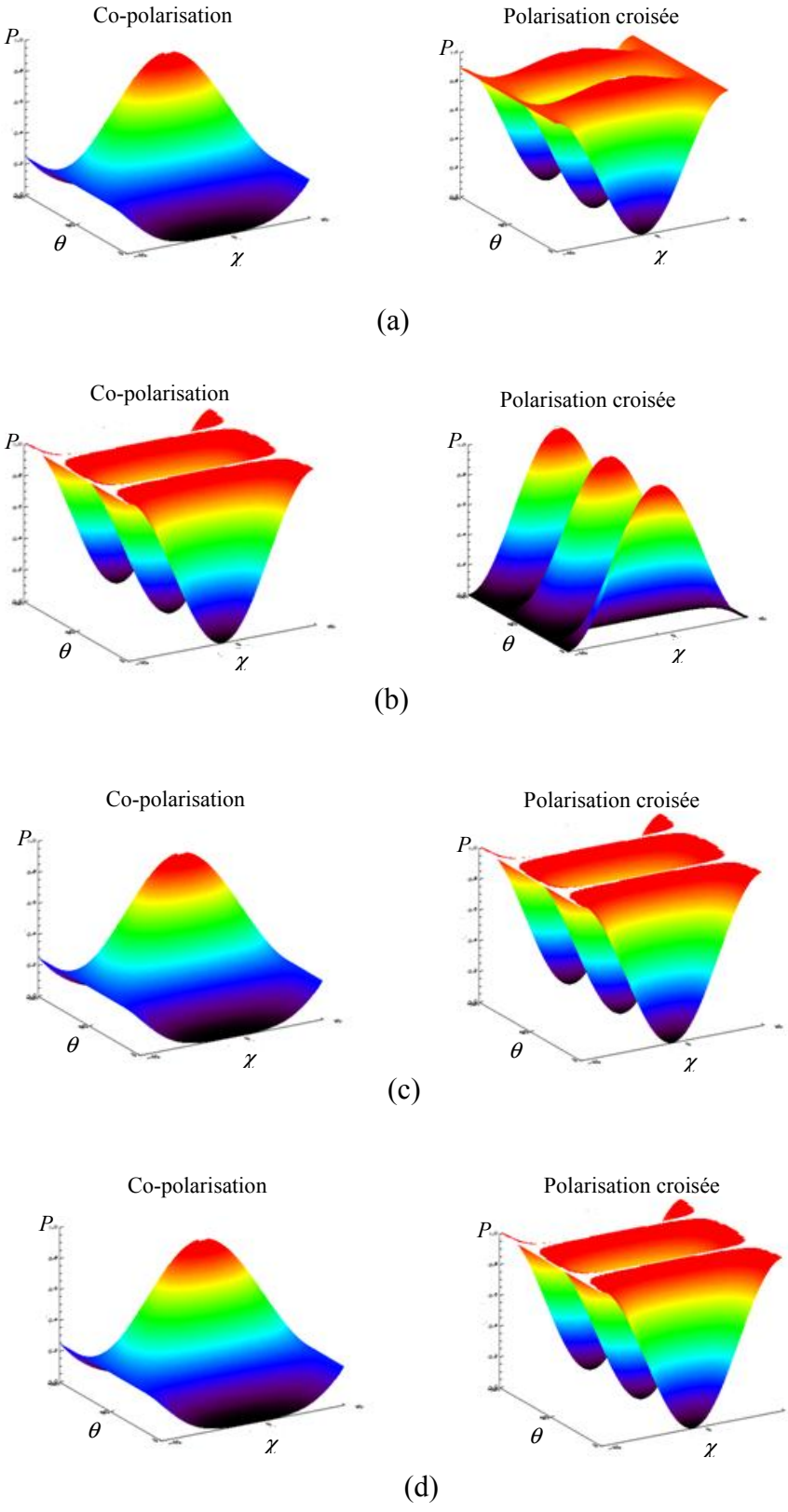


Figure 7 : Signatures polarimétriques en co-polarisation et en polarisation croisée avant et après filtrage de l'image d'Alger, (*P* : puissance reçue, θ : angle d'orientation, χ : angle d'ellipticité). (a) Originale, (b) Filtrée par le filtre Sigma, (c) Filtrée par le filtre Sigma amélioré, (d) Filtrée par le filtre Sigma améliorée avec détection de forts diffuseurs.

Figure 7: Co-polarization and cross-polarization polarimetric signatures before and after filtering of the image of Algiers, (P: received power, θ : orientation angle, χ : ellipticity angle), (a) Original, (b) Filtered by the Sigma filter, (c) Filtered by the improved Sigma filter, (d) Filtered by the Sigma improved filter with strong scatterers detection.

7.4 Evaluation par la classification

La classification consiste à partitionner l'image en des classes différentes, représentant le type des objets terrestres de la scène observée par le radar (état de surface des sols, présence de bâtis, végétation, etc.). Les pixels présentant des propriétés plus ou moins semblables sont regroupés dans un même thème appelé classe.

Dans cette partie nous évaluons les filtres étudiés par une classification non supervisée. Pour cela, nous avons classifié les images *Span* des images d'Alger, de Munich et d'Oran, avant et après filtrage. Nous avons utilisé une classification non supervisée de type isodata effectuée grâce au logiciel ENVI 4.5 (figure 8) (figure 9) (figure 10).

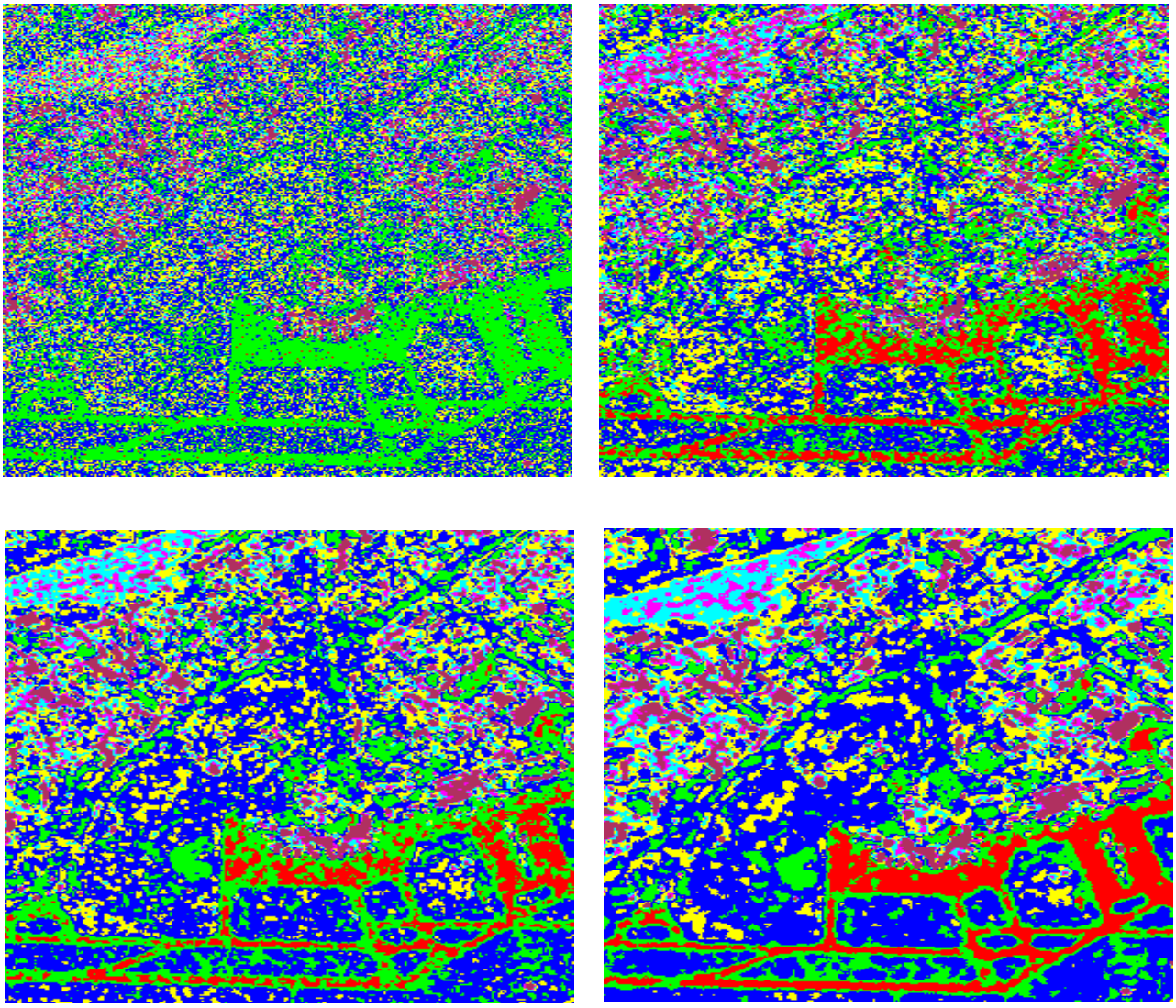


Figure 8 : Images *Span* classifiées d'Alger. (a) Originale, (b) Filtrée par le filtre Sigma, (b) Filtrée par le filtre Sigma amélioré, (d) Filtrée par le filtre Sigma améliorée avec détection de forts diffuseurs.
Figure 8: Span *classified images of Algiers. (a) Original, (b) Filtered by the Sigma filter, (c) Filtered by the improved Sigma filter, (d) Filtered by the Sigma improved filter with strong scatterers detection.*

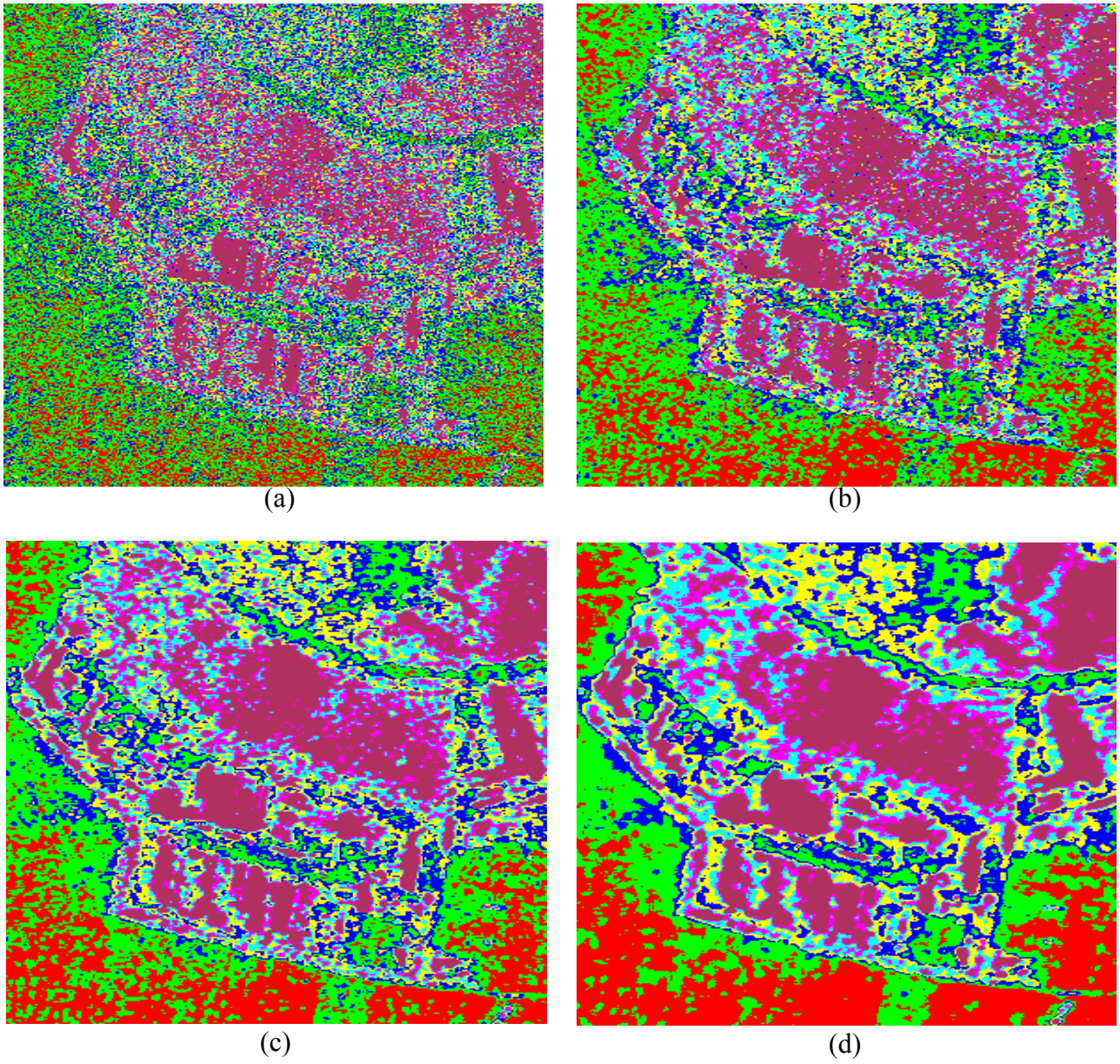


Figure 9 : Images *Span* classifiées de Munich. (a) Originale, (b) Filtrée par le filtre Sigma, (b) Filtrée par le filtre Sigma amélioré, (d) Filtrée par le filtre Sigma améliorée avec détection de forts diffuseurs.
Figure 9: Span *classified images of Munich. (a) Original, (b) Filtered by the Sigma filter, (c) Filtered by the improved Sigma filter, (d) Filtered by the Sigma improved filter with strong scatterers detection*.

D'après les figures 8, 9, 10 et en faisant une comparaison avec les images de la figure 3, nous observons que les classes dans les images originales n'apparaissent pas bien, par contre les images filtrées présentent des classes plus détaillées surtout du point de vue contours. Les images filtrées classifiées sont de meilleures qualités par rapport aux images originales surtout celle filtrée par le filtre Sigma amélioré avec détection de forts diffuseurs.

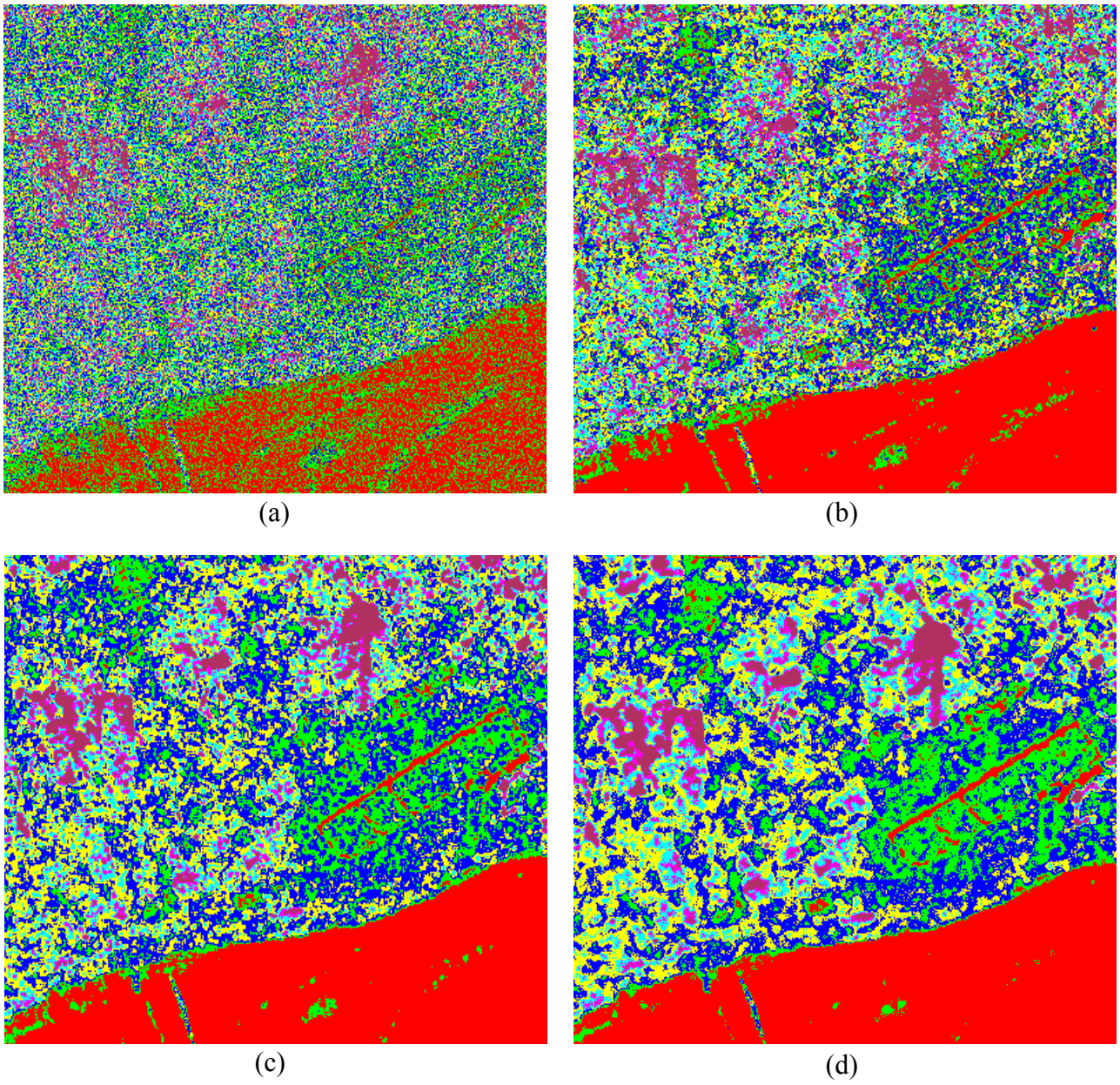


Figure 10 : *Span* classified images of Oran. (a) Original, (b) Filtered by the Sigma filter, (c) Filtered by the improved Sigma filter, (d) Filtered by the Sigma improved filter with strong scatterers detection.

8. CONCLUSION

Le filtre Sigma est basé sur le calcul de la moyenne locale à partir des pixels compris dans un intervalle de deux - Sigma. Le filtre Sigma amélioré est basé sur l'estimation de l'erreur quadratique moyenne minimale MMSE pour la réduction adaptative du speckle. Le filtre Sigma amélioré avec préservation de forts diffuseurs se base sur la préservation des points fortement réfléchis et l'application de la MMSE sur les pixels de l'image.

L'étude comparative entre les filtres a été faite en se basant sur la visualisation et les résultats statistiques de chaque méthode ainsi que sur la vérification de la conservation de l'information polarimétrique. Cette dernière est primordiale à la validation des procédures de filtrage polarimétriques.

L'évaluation des résultats obtenus montre que le filtre Sigma amélioré avec détection de forts diffuseurs offre une meilleure qualité de l'image, non seulement dans les secteurs uniformes mais aussi dans les régions hétérogènes et permet essentiellement de préserver l'information polarimétrique.

Les images filtrées seront utilisées dans diverses applications telles que la classification, la segmentation, la création de MNT (Module Numérique du Terrain), etc.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'agence spatiale canadienne pour la mise à disposition des données polarimétriques RADARSAT-2 de la région d'Alger (Algérie), bande C du 11 Avril 2009, ainsi que la compagnie privée Aerosensing pour la mise à disposition des données polarimétriques aéroportées de la zone de Munich, ESAR bande P de 2001. Nous remercions également l'Agence Spatiale Européenne ESA pour la mise à disposition des données bipolarisées ASAR (ENVISAT) de la zone d'Oran (Algérie) en bande C dans le cadre du projet AOE 703.

RÉFÉRENCES

Bouchemakh, L., Smara, Y., Boutarfa, S. and Hamadache, Z. (2008) A Comparative Study of Speckle Filtering In Polarimetric Radar SAR Images. IEEE Proceedings of the International Conference on Information & Communication Technologies: from Theory to Applications ICTTA, 07 - 11 April 2008, Damascus, Syria.

Boutarfa, S., Smara, Y., Bouchemakh, L. and Hamadache, Z. (2009) Etude comparative de méthodes de filtrage du speckle dans les images radar SAR polarimétriques. 6ième Conférence sur le Génie Electrique CGE'06, 13 - 14 Avril 2009, Alger, Algérie.

Boutarfa, S., Smara, Y., Hadded, L. et Bouarifi, S. (2010) Filtre Sigma et ses variantes appliqués sur les images POLSAR : Étude comparative, 12èmes Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUF, 23 - 25 novembre 2010, Monastir, Tunisie.

Centre canadien de télédétection. (2009) Tutoriel : La polarimétrie radar - Signatures polarimétriques. http://cct.rncan.gc.ca/resource/tutor/polarim/chapter5

Farage, G., Foucher, S., and Benie, G.B. (2007) PolSAR Image filtering based on featured detecting unsing the wavelet transform. IEEE Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'07, Barcelona, Spain.

Ferro-Famil, L. (2007) Envisat / ASAR dual polarization case. Tutorial on SAR Polarimetry.

Lee, J.S. (1980) Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 2, no 2, p.165 - 168.

Lee, J.S. (1981) Refined filtering of image noise using local statistics. Computer graphics and Image Processing. vol. 15. p. 380 - 389.

Lee, J.S. (1983) Digital image noise smoothing and the sigma filter. Computer Vision, Graphics and Image Processing, vol. 24, p. 255 - 269.

Lee, J.S., Hoppel, K. and Mango, S. (1992) Unsupervised speckle noise modeling of radar images. International Journal of Imaging System and Technology, vol. 4, no 1, p. 298 - 305.

Lee, J.S, Grunes, M.R. and De Grandi, G. (1999) Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing, vol. 37, no 5, p. 2363 - 2373.

Lee, J.S., Grunes, M.R., Shuler, D.L., Pottier, E. and Ferro-Famil, L. (2006) Scattering-model-based speckle filtering of Polarimetric SAR data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. vol. 44, no 1, p. 176 - 187.

Lee, J. S., Wen, J. H., Ainsworth, T. L, Chen, K. S. (2008) Speckle filtering of dual-polarization and polarimetric SAR data based on improved sigma filter. IEEE International on Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2008.

Lee, J. S., Wen, J. H., Ainsworth, T. L, Chen, K. S. and Chen, A. J. (2009) Improved Sigma filter for speckle filtering of SAR imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, vol. 47, no 5, p. 202 - 213.

Lee, J. S. and Pottier, E. (2009) Polarimetric radar imaging : from basics to applications. CRC Press, Taylor & Francis Group, p. 143 - 177.

Nan, S., Bingchen, Z. and Yanfei. W. (2007) Structural adaptive and optimal speckle filtering in multilook full polarimetric SAR images. ScienceDirect, Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 18, no 2, p. 217 - 222.

Novak, L.M. and Burl. M.C. (1990) Optimal Speckle Reduction in Polarimetric SAR Imagery. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 26, no 2, p. 293 - 305.

Ouarzeddine, M., Souissi, B. and Belhadj-Aïssa, A. (2006) Target Detection and Characterization using H/alpha Decomposition and Polarimetric Signatures. Information and Communication Technologies. ICTTA'06, vol. 1, p.395 - 400.

Russel, C.H., and Gonzelo, R.A. (1991) Ranking in Rp and its use in multivariate image estimation. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 1, no 2, p. 197 - 209.

Saad A. et El Assad, S. (1997) Filtrage d'ordre vectoriel adaptatif du speckle dans les images ROS polarimétriques. Comparaison avec une classe de filtres. TS. Traitement du signal, vol. 14, no 3, p. 285 - 300.

Ulaby, F. T. and Elachi, C. (1990) Radar polarimetry for geosciences applications.

Artech House, Norwood, MA.

Vasile, G., Trouve, E., Lee, J.S. and Buzuloiu, V. (2006) Intensity-driven-adaptive neighborhood technique for polarimetric and interferometric parameter estimation, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 44, no 4, p. 994 - 1003.